

Ю. Л. САЕНКО, Т. К. БАРАНЕНКО

ВИБІР ВИДУ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ЗМІНИ СТРУМУ РІЗКОЗМІННОГО НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Досліджено вплив на електромагнітні показники електричної мережі виду кореляційної функції, використовуваної для моделювання випадкового процесу зміни струму різкозмінного нелінійного навантаження у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази на прикладі дугової сталеплавильної печі. Зроблено висновки про можливість використання будь-якого з трьох розглянутих видів кореляційних функцій (експоненційної, експоненційно-косинусної або експоненційно-косинусно-синусної) в разі моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження при дослідженні питань, пов'язаних з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин електроустановки при протіканні несинусоїдного струму і оцінкою параметрів електромагнітної сумісності. Показано, що при дослідженні процесів, пов'язаних з нагріванням провідників і струмоведучих частин електроустановки в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, можлива заміна одного виду кореляційної функції модульованого випадкового процесу іншим за умови рівності площ під кривими взаємозамінних кореляційних функцій; при розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності, для моделювання випадкового процесу повинна використовуватися тільки експоненційно-косинусно-синусна кореляційна функція, що забезпечує умову диференційованості модульованого випадкового процесу. Всі висновки, отримані на прикладі моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження при роботі дугової сталеплавильної печі, поширюються на моделювання випадкових процесів при роботі будь-яких інших видів різкозмінних нелінійних навантажень.

Ключові слова: моделювання, випадковий процес, кореляційна функція, несинусоїдність, нагрів, електромагнітна сумісність, компенсація реактивної потужності.

Ю. Л. САЕНКО, Т. К. БАРАНЕНКО

ВЫБОР ВИДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Исследовано влияние на электромагнитные показатели электрической сети вида корреляционной функции, используемой для моделирования случайного процесса изменения тока резкопеременной нелинейной нагрузки в виде амплитудно-модулированного колебания со случайным законом изменения амплитуды и начальной фазы на примере дуговой сталеплавильной печи. Сделаны выводы о возможности использования любого из трех рассмотренных видов корреляционных функций (экспоненциальной, экспоненциально-косинусной или экспоненциально-косинусно-синусной) в случае моделирования случайного процесса изменения тока нагрузки при исследовании вопросов, связанных с явлением нагрева проводников и токоведущих частей электрооборудования при протекании несинусоидального тока и оценкой параметров электромагнитной совместимости. Показано, что при исследовании процессов, связанных с нагревом проводников и токоведущих частей электрооборудования в электрических сетях с резкопеременными нелинейными нагрузками, возможна замена одного вида корреляционной функции модулирующего случайного процесса другим при условии равенства площадей под кривыми взаимозаменяемых корреляционных функций; при решении задач, связанных с компенсацией реактивной мощности для моделирования случайного процесса должна использоваться только экспоненциально-косинусно-синусная корреляционная функция, обеспечивающая условие дифференцируемости модулирующего случайного процесса. Все выводы, полученные на примере моделирования случайного процесса изменения тока нагрузки при работе дуговой сталеплавильной печи, распространяются на моделирование случайных процессов при работе любых других видов резкопеременных нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: моделирование, случайный процесс, корреляционная функция, несинусоидальность, нагрев, электромагнитная совместимость, компенсация реактивной мощности.

Y. L. SAYENKO, T. K. BARANENKO

CHOICE OF THE CORRELATION FUNCTIONS FOR RANDOM PROCESS SIMULATION OF RAPID-CHANGING NONLINEAR LOAD CURRENT

The influence of the type of correlation function used for a random process simulation of a non-linear load current as the amplitude-modulated oscillation with a random law of variation of the amplitude and initial phase on the electromagnetic indices of the electrical network was studied using the example of an electric steel-melting furnace. Conclusions about possibility of using any of the three considered types of correlation functions (exponential, exponential-cosine or exponential-cosine-sine) in the case of simulating a random process of rapid-changing load current when studying issues related to the phenomenon of heating of conductors by non-sinusoidal currents and evaluation of electromagnetic compatibility parameters. It is shown that in the study of processes associated with heating of conductors and current-carrying parts of electrical equipment in electric networks with rapid-changing non-linear loads, it is possible to replace one type of correlation function of a modulating random process with another, provided that the areas under the interchangeable correlation functions are equal; when solving problems related to reactive power compensation, only an exponential-cosine-sine correlation function should be used to simulate a random process, providing the condition of differentiability of the modulating random process. All conclusions obtained on the example of the random process simulation of the rapid-changing load current during the operation of an electric steel arc furnace are applied to the simulation of random processes during the operation of any other types of rapid-changing non-linear loads.

Keywords: simulation, random process, correlation function, non-sinusoidality, heating, electromagnetic compatibility, reactive power compensation.

Постановка проблеми. При роботі різкозмінних нелінійних навантажень, таких як дугові сталеплавильні печі, зварювальні установки, приводи прокатних станів і т. п. відбувається спотворення кривої споживаного струму, амплітудний спектр якого містить як вищі гармонійні складові, так і

© Ю. Л. Сасенко, Т. К. Бараненко, 2019

інтергармоніки. У зв'язку з тим, що на сучасних промислових підприємствах спостерігається тенденція до зростання подібних навантажень, актуальним завданням є розробка універсального підходу до моделювання випадкового процесу зміни споживаного струму різкозмінними нелінійними навантаженнями. Змодельований випадковий процес повинен забезпечити можливість здійснювати на його основі інженерні дослідження в області широкого кола завдань, що пред'являють різні вимоги до імовірнісних характеристик випадкового процесу зміни струму навантаження.

Аналіз публікацій. Завданням моделювання випадкового процесу зміни струму є відображення реальних електромагнітних процесів, що протікають в електричній мережі при роботі різкозмінного нелінійного навантаження. Так дугова сталеплавильна піч є джерелом спотворення синусоїдності кривої струму і напруги, джерелом несиметрії та коливальних напруги, потужним споживачем реактивної потужності, що в цілому знижує енергоефективність і надійність системи електропостачання і вимагає впровадження відповідних заходів. Розроблено цілу низку математичних моделей дугової сталеплавильної печі і її параметрів, призначених для дослідження окремих видів електромагнітних завад [1–3]. Для комплексного дослідження впливу дугової сталеплавильної печі на систему електропостачання необхідна універсальна математична модель, що дозволяє проводити як аналітичні дослідження, так і дослідження шляхом імітаційного моделювання [4–6]. Доцільно використовувати в якості такої універсальної математичної моделі уявлення кривої струму у вигляді амплітудно-модульованого коливання [5, 7]. Амплітудно-модульоване коливання являє собою випадковий процес, для моделювання якого необхідний вибір відповідної кореляційної функції.

Мета роботи. Метою цієї роботи є розробка рекомендацій щодо вибору виду кореляційної функції при моделюванні випадкового процесу зміни струму, споживаного різкозмінним нелінійним навантаженням, з урахуванням електромагнітних процесів, що протікають в системі електропостачання.

Виклад основного матеріалу. Представимо несинусоїдну криву струму, що містить як вищі гармонійні складові, так і інтергармоніки, у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази [8]

$$i(t) = (\xi(t) + 1) \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin(v\omega_0 t + \varphi_v) = (\xi(t) + 1) i^*(t), \quad (1)$$

де $\xi(t)$ – центрований стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним очікуванням і заданою кореляційною функцією;

I_{mv} – постійні амплітуди;

ω_0 – кутова частота;

φ_v – взаємно незалежні випадкові початкові фази, рівномірно розподілені на інтервалі $(-\pi, \pi)$;

$i^*(t)$ – струм навантаження, що містить основну та вищі гармоніки;

v – номер вищої гармоніки.

$$i^*(t) = \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin(v\omega_0 t + \varphi_v) \quad (2)$$

Кореляційна функція випадкового процесу струму нелінійного навантаження $i(t)$ має вигляд

$$K_i(\tau) = [K_{\xi}(\tau) + 1] \sum_{v=1}^{\infty} D_v \cos v\omega_0 \tau \quad (3)$$

де $K_{\xi}(\tau)$ – задана кореляційна функція модульовального випадкового процесу $\xi(t)$;

D_v – дисперсія v -ої гармоніки, $D_v = I_{mv}^2 / 2$.

Модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ в більшості випадків може характеризуватися однією з трьох видів кореляційних функцій:

- експоненційною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|}; \quad (4)$$

- експоненційно-косинусною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau; \quad (5)$$

- експоненційно-косинусно-синусною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right), \quad (6)$$

де D_{ξ} – дисперсія коливань струму;

α – коефіцієнт загасання кореляційної функції.

Вибір конкретного виду кореляційної функції $K_{\xi}(\tau)$ буде залежати від розв'язуваної задачі. Так при розв'язанні кола завдань, пов'язаних з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин електроустаткування при протіканні несинусоїдного струму, кореляційна функція $K_{\xi}(\tau)$ в більшості випадків може бути представлена будь-яким з трьох видів (4) – (6). При цьому імовірнісна оцінка процесів нагріву струмоведучих частин може бути виконана по спектральній щільності струму, пов'язаної з кореляційною функцією перетворенням Фур'є. При моделюванні випадкових процесів для дослідження явищ нагріву можлива заміна одного виду кореляційної функції іншим, так як визначальним фактором в даному випадку є енергія випадкового процесу, яка пов'язана з площею під кривою кореляційної функції. Наприклад, при заміні експоненційно-косинусною

кореляційної функції виду (5) на експоненційну виду (4) її еквівалентний коефіцієнт загасання $\alpha_{ек}$ буде визначатися виразом, знайденим виходячи з рівності площ під кривими кореляційних функцій виду (4) і (5), [9]

$$\alpha_{ек} = \alpha + \frac{\omega_0^2}{\alpha}, \quad (7)$$

де α і ω_0 – параметри вихідної експоненційно-косинусної кореляційної функції.

При розв'язанні низки задач, пов'язаних безпосередньо з оцінкою параметрів електромагнітної сумісності при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, для моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження також можливе застосування будь-якої з трьох кореляційних функцій (4) – (6). Як приклад на рис. 1, а наведено одну з реалізацій кривої мережного струму фази А дугової сталеплавильної печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання відповідно до виразу (1). Модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ заданий експоненційною кореляційною функцією виду (4), де дисперсія коливань струму $D_\xi = 9330 \text{ A}^2$, а коефіцієнт загасання $\alpha = 1,47 \text{ c}^{-1}$. На рис. 1, б наведено відповідний амплітудний спектр кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є безпосередньо по змодельованому графіку струму.

На рис. 2, а наведено одну з реалізацій кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання, де модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ заданий експоненційно-косинусною кореляційною функцією виду (5) з параметрами: $D_\xi = 9330 \text{ A}^2$, $\alpha = 1,47 \text{ c}^{-1}$, $\omega_0 = 2,69 \text{ c}^{-1}$. На рис. 2, б наведено відповідний амплітудний спектр.

На рис. 3, а наведено реалізацію кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання, де модульовальний випадковий процес заданий експоненційно-косинусно-синусною кореляційною функцією виду (6) з такими ж параметрами, як і в випадку з експоненційно-косинусною кореляційною функцією. На рис. 3, б наведено відповідний амплітудний спектр.

В результаті численних досліджень було отримано, що при заданих параметрах випадкового процесу математичне очікування коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму $M[K_I]$ склало:

- при використанні експоненційної кореляційної функції $M[K_I] = 15,7 \%$;
- при використанні експоненційно-косинусної кореляційної функції $M[K_I] = 17,3 \%$;
- при використанні експоненційно-косинусно-синусної кореляційної функції $M[K_I] = 15,6 \%$.

Необхідно зазначити, що кореляційні функції кривих струмів, споживаних дуговими сталеплавильними печами, найкраще апроксимуються експоненційно-косинусними кореляційними функціями. Таким чином, похибка оцінки коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму при

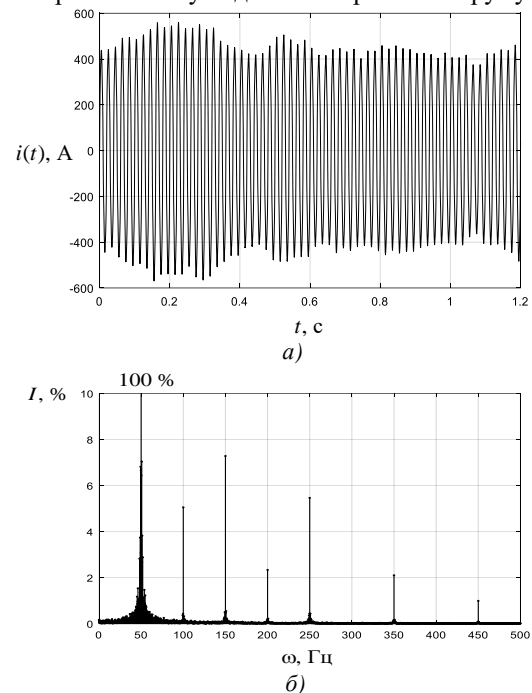


Рис. 1. Змодельована крива мережного струму фази А печі ДСП-100 а і відповідний амплітудний спектр (б) у випадку з експоненційною кореляційною функцією

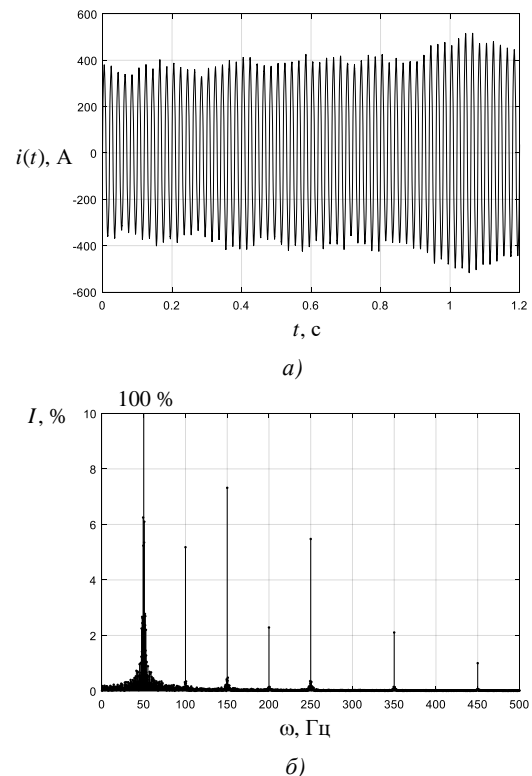


Рис. 2. Змодельована крива мережного струму фази А печі ДСП-100 а і відповідний амплітудний спектр (б) у випадку з експоненційно-косинусною кореляційною функцією

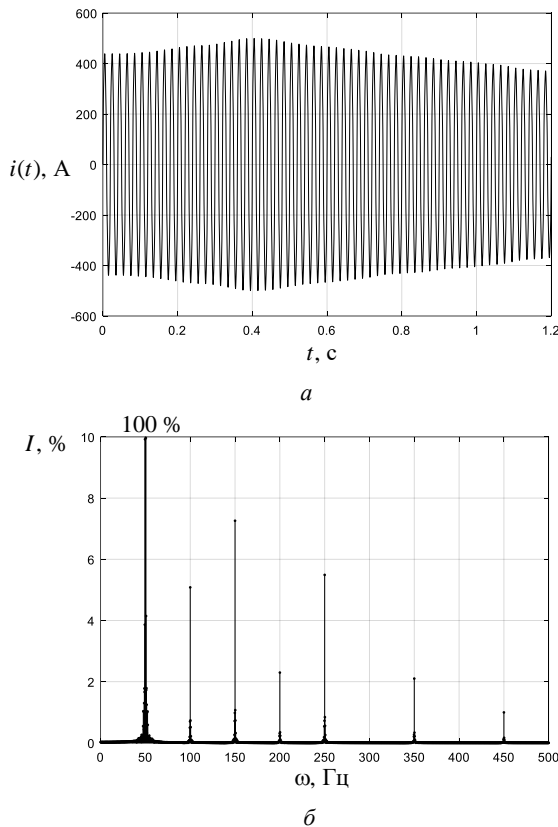


Рис. 3. Змодельована крива мережного струму фази *A* печі ДСП-100 *a*) і відповідний амплітудний спектр *б*) у випадку з експоненційно-косинусно-синусною кореляційною функцією

використанні різних видів кореляційних функцій для моделювання одного і того ж випадкового процесу зміни струму навантаження ДСП не перевищила 10 %. Такий результат дозволяє зробити висновок, що при проведенні різних досліджень шляхом моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження ДСП, можливе застосування будь-якого з видів кореляційних функцій (4) – (6) в залежності від розв'язуваного кола завдань.

Однак при дослідженні проблеми електромагнітної сумісності при роботі дугових сталеплавильних печей шляхом моделювання випадкових процесів змін струмів навантажень такий підхід, як заміна одного виду кореляційної функції іншим, заснована на рівності площ під кривими кореляційних функцій, як правило, є неприйнятним. Це пов'язано з тим, що визначальним фактором, який впливає на величину коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму, є не енергія випадкового процесу зміни струму навантаження, а швидкість його зміни, яка характеризується параметрами кореляційної функції. Результати досліджень показали, що зі збільшенням коефіцієнта загасання α і кутової частоти кореляційної функції ω_0 зростає і коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму. Тоді при заміні експоненційно-косинусної кореляційної функції виду (5) на експоненційну виду (4) і визначенні еквівалентного коефіцієнта загасання $\alpha_{ек}$ за виразом

(7), може бути отримана завищена оцінка коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму.

При розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, необхідно виконання умови диференційовності випадкового процесу $\xi(t)$. Математичне сподівання потужності батареї конденсаторів $M[Q_{БК}]$ може бути знайдено, застосовуючи метод лінеаризації випадкових процесів, за виразом [10]

$$M[Q_{БК}] = \frac{(1 - aD_{\xi})U_{ном}^2 \sum_{v=1}^{\infty} v U_v I_v \sin \varphi_v}{(1 + a^2 D_{\xi'}) \sum_{v=1}^{\infty} v^2 U_v^2 + a^2 D_{\xi'} \sum_{v=1}^{\infty} v^2 U_v^2}, \quad (8)$$

де a – коефіцієнт, який визначається відношенням потужності навантаження S_n до потужності короткого замикання $S_{кз}$, $a = S_n / S_{кз}$;

U_v, I_v – діючі значення v -их гармонійних складових напруги і струму відповідно;

φ_v – кут зсуву фаз v -их гармонік напруги і струму;

$D_{\xi'}$ – дисперсія похідної центрованого стаціонарного випадкового процесу $\xi(t)$.

Умовою диференційовності випадкового процесу $\xi(t)$ є безперервність похідної його кореляційної функції в околі точки $\tau = 0$. Цій вимозі задовольняє експоненційно-косинусно-синусна кореляційна функція виду (6). Тоді дисперсія похідної процесу $\xi(t)$

$$\begin{aligned} D_{\xi'} &= - \left. \frac{d^2 K_{\xi}(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} = \\ &= D_{\xi} (\alpha^2 + \omega_0^2) e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right) \Big|_{\tau=0} = \\ &= D_{\xi} (\alpha^2 + \omega_0^2). \end{aligned} \quad (9)$$

Необхідно відзначити, що всі висновки, зроблені на підставі аналізу кривих струмів при роботі дугових сталеплавильних печей, поширюються на аналіз параметрів режимів при роботі будь-яких видів різкозмінних нелінійних навантажень.

Висновки. 1. При дослідженні несинусоїдних режимів, що виникають в електричних мережах при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, несинусоїдна крива струму може бути представлена у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази, де модуляція здійснюється за допомогою центрованого стаціонарного випадкового процесу із заданою кореляційною функцією.

2. При розв'язанні завдань, пов'язаних як з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин

електроустаткування при протіканні несинусоїдного струму, так і з оцінкою параметрів електромагнітної сумісності при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, кореляційна функція модульовального випадкового процесу може бути представлена будь-яким з трьох видів відповідно до виразів (4) – (6). Однак при дослідженні процесів, пов'язаних з нагріванням провідників і струмоведучих частин електроустаткування, можлива заміна одного виду кореляційної функції модульовального випадкового процесу іншим; при дослідженні ж проблеми електромагнітної сумісності така заміна виявляється неприйнятною.

3. При розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, кореляційна функція модульовального випадкового процесу повинна мати безперервну похідну в околиці точки $\tau = 0$ для забезпечення умови диференційовності випадкового процесу. Цій вимозі відповідає кореляційна функція виду (6).

Список літератури

1. Mokhtari H. A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB / H. Mokhtari, M. Hejri // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – 2002. – no. 3. – P. 2078–2083.
2. Kang J. Analysis on AC electric Arc Furnace Flicker and Its Influencing Factors / J. Kang, Z. G. Shao et al. // Journal of Electric Power Science and Technology. – 2010. – no. 25. – P. 66–71.
3. Залужный М. Ю. Моделирование потерь в электротехнологическом комплексе при совместной работе дуговых сталеплавильных печей / М. Ю. Залужный // Донецьк: Наукові праці ДонНТУ серія: “Електротехніка і енергетика”. – 2013. – №1(14). – С.100–103.
4. Kang J. Research on Sampling Frequency of Flicker Measurement / W. Kang, X. W. Yan et al. // Electrical Measurement & Instrumentation. – 2009. – no. 46. P. 1–5.
5. Zhang Lixia. A Practical Electric Arc Furnace Model for Computer Simulation / Lixia Zhang, Wei Kang, Xiaoping Zhang // Energy and Power Engineering. – 2017. – no. 9. – P. 445–451.
6. Гончарук В. В. Імітаційне моделювання процесів в системах електропостачання та його застосування для дослідження розподілу випадкових величин / В. В. Гончарук // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2013. – № 3. – С. 82–86.
7. Tomasovic Teklic Ana. Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network / Ana Tomasovic Teklic, Bozidar Filipovic-Grcic, Ivica Pavic // Electric Power Systems Research. – 2017. – no. 146. – P. 218–227.
8. Саєнко Ю. Л. Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов для оценки потерь при наличии высших

гармоник и интергармоник / Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, И. Ю. Саєнко // Электрификация транспорта. – 2017. – № 13. – С. 129–133.

9. Жежеленко И. В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саєнко, В. П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 126 с.

10. Sayenko Yuri. Kompensacja mocy biernej w sieciach elektrycznych ze zrodłami interharmonicznymi / Yuri Sayenko, Tetiana Baranenko, Ryszard Pawelek // Kompatybilność Electromagnetyczna w Elektrotechnice i Elektronice EMC'2018: X Krajowe Sympozjum. – Lodz, 2018. – S. 41-47.

References (transliterated)

1. Mokhtari H., Hejri M. A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 2002, no. 3, pp. 2078–2083.
2. Kang J., Shao Z. G. et. al. Analysis on AC electric Arc Furnace Flicker and Its Influencing Factors. *Journal of Electric Power Science and Technology*. 2010, no. 25, pp. 66–71.
3. Zaluzhnyy M. Ju. Modelirovanie poter' v jelectrotehnologicheskome komplekse pri sovmestnoy rabote dugovyh staleplavil'nyh pechej [Simulation of losses in the electrotechnological complex during the joint operation of arc steel-smelting furnaces] *Donetsk: Naukovi praci DonNTU serija: Elektrotehnika i energetyka*. 2013, № 1(14), pp. 100–103.
4. Kang W., Yan X. W. et al. Research on Sampling Frequency of Flicker Measurement. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2009, no. 46, pp. 1–5.
5. Lixia Zhang, Wei Kang, Xiaoping Zhang. A Practical Electric Arc Furnace Model for Computer Simulation. *Energy and Power Engineering*. 2017, no. 9, pp. 445–451.
6. Goncharuk V. V. Imitacijne modeljuvannja procesiv v systemah elektropostachannja ta jogo zastosuvannja dlja doslidzhennja rozpodilu vypadkovykh velychyn [Simulation of processes in power supply systems and their application for studying the distribution of random variables] *Visnyk Derzhavnogo universytetu informacijno-komunikacijnyh tehnologij*. 2013, № 3, pp. 82–86.
7. Ana Tomasovic Teklic, Bozidar Filipovic-Grcic, Ivica Pavic. Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network. *Electric Power Systems Research*. 2017, no. 146, pp. 218–227.
8. Saenko Ju. L., Baranenko T. K., Saenko I. Ju., Primenenie spektral'no-korreljacionnoj teorii sluchajnyh processov dlja ocenki poter' pri nalichii vysshih harmonik i intergarmonik [The spectral correlation theory application of random processes for estimation of power losses involving higher harmonic and intergarmonic] *Elektrifikacija transportu*. 2017, № 13, pp. 129–133.
9. Zhezhelenko I. V. Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschetah harakteristik jelektricheskikh nagruzok potrebitel'ej [Methods of probabilistic modeling in calculating the characteristics of consumers' electrical loads]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1990, 126 p.
10. Sayenko Yuri, Baranenko Tetiana, Pawelek Ryszard. Kompensacja mocy biernej w sieciach elektrycznych ze zrodłami interharmonicznymi. *Kompatybilność Electromagnetyczna w Elektrotechnice i Elektronice EMC'2018: X Krajowe Sympozjum*. Lodz, 2018, P. 41-47.

Надійшла (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саєнко Юрій Леонідович (Саєнко Юрий Леонидович, Sayenko Yuriy Leonidovich) – доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», декан енергетичного факультету; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>; e-mail: ysayenko@gmail.com

Бараненко Тетяна Костянтинівна (Бараненко Татьяна Константиновна, Baranenko Tetiana Kostjantynivna) – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри електроенергетичних комплексів та систем; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9436-8484>; e-mail: tbaranenko@gmail.com